

ЛІТЕРАТУРА



НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
**Тернопільський національний технічний університет  
імені Івана Пулюя**

*Кафедра обладнання  
харчових технологій*

**ПОСІБНИК**

для практичних та самостійних робіт  
з курсу «Теоретичні основи теплотехніки»

для студентів денної та заочної форми навчання  
за напрямками

6.050503 «Машинобудування»,

6.050502 «Інженерна механіка»,

6.070106 «Автомобільний транспорт»

6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані  
технології»

**Тернопіль 2014 р.**

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет  
імені Івана Пулюя

*Кафедра обладнання  
харчових технологій*

## **ПОСІБНИК**

для практичних та самостійних робіт  
з курсу «Теоретичні основи теплотехніки»

для студентів денної та заочної форми навчання  
за напрямками

6.050503 «Машинобудування»,

6.050502 «Інженерна механіка»,

6.070106 «Автомобільний транспорт»

6.050202 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані  
технології”

**Тернопіль 2014 р.**

**УКЛАДАЧІ:**

к.т.н., доц. Шинкарик М.М.  
ас. Кравець О.І.

**РЕЦЕНЗЕНТ:**

д.т.н., проф. Стадник І.Я.

**ВІДПОВІДАЛЬНИЙ**

**ЗА ВИПУСК:**

д.т.н., проф. Вітенько Т.М.

Методичні вказівки розглянуто і затверджено на засіданні кафебри обладнання харчових технологій.

Протокол № \_\_\_\_ від \_\_\_\_\_

Схвалено і рекомендовано до друку методичною Радою факультету переробних і харчових виробництв Тернопільського національного технічного університету ім. І.Пулую.

Протокол № \_\_\_\_ від \_\_\_\_\_

Методичні вказівки складені з врахуванням методичних розробок інших вузів, а також матеріалів літературних джерел, наведених у переліку.

## ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ

Методичні вказівки містять програму курсів «Теоретичні основи теплотехніки», перелік лабораторних робіт, приклади розв'язування задач, завдання для контрольних робіт та рекомендовану літературу.

Для успішного вивчення курсу студент повинен:

- ознайомитись з програмою курсу, підібрати необхідну літературу, засвоїти мету та задачі курсу;
- на основі лекційного матеріалу та опрацьованих літературних джерел скласти конспект;
- чітко засвоїти визначення та суть основних понять та законів термодинаміки і теплообміну;
- виконати передбачений навчальним планом об'єм практичних та лабораторних занять;
- виконати контрольну роботу згідно варіанту, заданого викладачем.

Після виконання всіх лабораторних та практичних робіт студент допускається до здачі екзамену.

## МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДИСЦИПЛІНИ

Теоретичні основи теплотехніки – загально-технічна фундаментальна дисципліна. Мета викладення дисципліни - підготовка спеціалістів за напрямками: інженерна механіка, машинобудування, автомобільний транспорт. Завдання дисципліни - формування вмінь і навичок в таких напрямках:

- знання основних законів перетворення теплоти в роботу;
- вивчення властивостей робочих тіл;
- аналіз основних термодинамічних процесів,
- вивчення загальних закономірностей теплообміну і шляхів інтенсифікації;
- вивчення методів оцінки енерготехнологічних систем в різних галузях промисловості.

## ПРОФЕСІЙНІ НАВИКИ, ВМІННЯ ТА ЗНАННЯ, НАБУТІ В РЕЗУЛЬТАТІ ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ

Студент повинен знати:

- основні величини, які характеризують термодинамічний стан системи, їх фізичну суть, співвідношення між ними;
- закони термодинаміки;

- властивості ідеальних газів і газових сумішей;
- основні термодинамічні процеси ідеальних газів;
- властивості реальних газів;
- особливості термодинамічних процесів для реальних газів;
- принцип побудови діаграм для водяної пари і вологого повітря;
- закономірності витікання і дроселювання газів і пари;
- теоретичні цикли паросилових установок, двигунів внутрішнього згорання;
- види теплообміну в технологічних системах, закони теплообміну, шляхи інтенсифікації теплообміну,
- методи оцінки ефективності енерготехнологічних систем.

## НАВИКИ ТА ВМІННЯ

Студент повинен вміти:

- встановити залежність між параметрами, які характеризують робоче тіло;
- встановити кількісні співвідношення між калориметричними величинами в процесах, напрям термодинамічних процесів, їх можливість на основі першого та другого закону термодинаміки;
- встановити залежність між термічними і калориметричними характеристиками, визначити роботу і кількість підведеної теплоти в термодинамічних процесах ідеального газу;
- визначити стан водяної пари і її характеристики, а також проводити розрахунки термодинамічних процесів з використанням діаграм і таблиць води і водяної пари;
- проводити розрахунок термодинамічних процесів і знаходити параметри вологого повітря по  $h$ - $s$  діаграмі і по відповідних розрахункових залежностях;
- проводити розрахунки процесів витікання і дроселювання газів і водяної пари за діаграмою і по розрахункових формулах;
- проводити розрахунки процесів теплообміну і теплообмінних апаратів,
- аналізувати термодинамічні процеси з точки зору їх ефективності.

## ОСНОВНІ ВИХІДНІ ПРОФЕСІЙНІ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ НАВИКИ, ЗНАННЯ НЕОБХІДНІ ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ

Для вивчення дисципліни «Теоретичні основи теплотехніки» студент повинен володіти:

- розділами математики, які відносяться до методів розв'язку диференціальних рівнянь;
- розділами фізики, які стосуються вивчення властивостей тіл і термодинамічних процесів;
- вмінні працювати з обчислювальною технікою;
- знати розділи гідравліки, які вивчають рух рідин.

### ЗМІСТ ДИСЦИПЛІНИ «ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕПЛОТЕХНІКИ»

ТЕМА 1. Основи технічної термодинаміки. (2 год.) Значення теплоенергетики в народному господарстві. Мета і завдання курсу. Основні визначення технічної термодинаміки. Робоче тіло і параметри стану.

Методичні вказівки.

Матеріал цієї теми представляє собою комплекс визначень і понять, на базі яких викладені інші теми. Тому студент повинен чітко засвоїти основні поняття і визначення. Література: [1]-18-23; [2]-10-12; [3]-9-15.

ТЕМА 2. Теорія теплообміну. (2 год.) Теплопровідність. Закон Фур'є. Коефіцієнт теплопровідності. Диференціальне рівняння теплопровідності, умови однозначності. Теплопровідність плоскої і циліндричної стінок Теплопровідність тіл із внутрішнім джерелом теплоти. Нестационарна теплопровідність.

Методичні вказівки.

Зверніть увагу, що одержати співвідношення для визначення теплового потоку, а також розподілення температури по товщині тіла конкретної геометричної форми можна, розв'язавши диференціальне рівняння теплопровідності при відповідних умовах однозначності.

Література: [1]-134-151; [2]-85-92.

Конвективний теплообмін. (2 год.) Закон Ньютона-Ріхмана, коефіцієнт тепловіддачі. Теорія подібності явищ. Теореми подібності. Критерії подібності. Критеріальні рівняння вільної і вимушеної конвекції.

Методичні вказівки.

При вирішенні задач конвективного теплообміну необхідно визначити коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$ . Коефіцієнт  $\alpha$  не є фізичною характеристикою тіла, а характеризує взаємодію двох тіл: рідини і твердого тіла. Коефіцієнт тепловіддачі залежить від багатьох фізичних величин, які є також в багатьох випадках взаємозалежними. Для визначення коефіцієнту тепловіддачі доцільно використовувати теорію подібності. Студент повинен вияснити особливості даного конвективного теплообміну, встановити визначальні розміри і температуру, а також визначальні критерії.

Література: [1]-151-164; [2]-102-116.

Теплопередача. (2 год.) Рівняння теплопередачі. Визначення коефіцієнта теплопередачі для плоскої і циліндричної стінки. Критичний діаметр теплопередачі. Шляхи інтенсифікації теплопередачі. Типи теплообмінників. Основи розрахунку теплообмінників.

Література: [1]-184-189; [2]-92-94, 124-134.

Променистий теплообмін. (2 год.) Закони променистого теплообміну тіл. Теплообмін між тілами розділеними прозорим середовищем. Теплообмін випромінюванням при наявності екрану.

Література: [1]- 174-184; [2]-87-88.

ТЕМА 3. Закони ідеальних газів і газових сумішей. (2 год.) Рівняння стану ідеального газу Газові суміші. Способи задання складу газових сумішей. Парціальний тиск і об'єм Закон Дальтона. Теплоємність газів і газових сумішей Фізична суть теплоємності, масова, об'ємна і мольна теплоємності. Ізохорна і ізобарна теплоємності Залежність теплоємності від температури.

Література. [1]-23-40; [2]-18-30; [3]-107-129.

Перший закон термодинаміки, процеси в ідеальному газі. (4 год.) Внутрішня енергія газу як функція стану. Термодинамічна робота стиснення і розширення. Робота зміни тиску. Зміна внутрішньої енергії. Формулювання і математичний зміст першого закону термодинаміки, його фізична суть. Дослідження термодинамічних процесів на основі першого закону термодинаміки. Зображення процесів  $p-v$ ,  $T-s$ , і  $h-s$  координатах.

Література: [1]-37-54; [2]-15-31; [3]-129-153; [6]-16-27.

ТЕМА 4. Реальні гази. Властивості водяної пари. (2 год.) Рівняння стану реального газу Ван-дер-Ваальса, рівняння Вукаловича і Новикова. Властивості і характеристики водяної пари,  $p$ - $t$  діаграма. Зображення процесу пароутворення в  $p$ - $v$ ,  $T$ - $s$ , і  $h$ - $s$  діаграмах.

Методичні вказівки.

Для реальних газів не виконується рівняння стану ідеального газу. Між молекулами реального газу діють сили взаємного притягання і відштовхування і в ході термодинамічних процесів реальний газ може змінювати свій агрегатний стан, тому розрахункові формули, одержані для ідеальних газів для реальних газів не виконуються. Виконується тільки завжди перший закон термодинаміки. Потрібно досконало вивчити основні характеристики водяної пари, проходження термодинамічних процесів в  $p$ - $v$  і  $T$ - $s$  діаграмах. При використанні  $h$ - $s$  діаграми необхідно звернути увагу на те, що використовується не вся діаграма, а тільки її частина. Лінія  $x = 1$  ділить діаграму на дві частини: в нижній частині - область вологої насиченої пари, в верхній - перегрітої. Ізотерми в області вологої насиченої пари співпадають з ізобарами.

Література: [1]-55-68; [2]-26-34, [3]-231-264.

ТЕМА 5. Термодинамічні властивості вологого повітря. (2 год.) Абсолютна і відносна вологість. Вологовміст повітря. Співвідношення між основними характеристиками  $p$ - $v$  діаграма водяної пари у вологому повітрі,  $h$ - $d$  діаграма вологого повітря. Термодинамічні процеси у вологому повітрі. Визначення параметрів вологого повітря. Визначення параметрів вологого повітря по  $H$ - $d$  діаграмі.

Методичні вказівки.

В першу чергу необхідно вивчити основні характеристики вологого повітря. В цілому до вологого повітря можна застосувати закони для ідеальних газових сумішей. При вивченні  $h$ - $d$  діаграми вологого повітря зверніть увагу на те, що температури мокрого і сухого термометра на лінії  $\phi = 100\%$  співпадають. Виясніть проходження процесів сушки і підігріву на  $h$ - $d$  діаграмі. При охолодженні повітря до лінії  $\phi = 100\%$  процес проходить при  $d = \text{const}$ , а далі - по лінії  $\phi = 100\%$  до вказаної температури. При цьому процес супроводжується конденсацією пари.

Література: [1]-68-72; [3]-334-348.

ТЕМА 6. Витікання газів і водяної пари. (2 год.) Перший закон термодинаміки для потоку газу, або пари. Зміна кінетичної енергії пари



при витіканні. Швидкість газу на виході із сопла, витрата газу через сопло. Критична швидкість витікання і масовий розхід. Витікання через сопла.

Методичні вказівки.

При розгляді цієї теми необхідно звернути увагу на допущення, які положені в основу виводу рівняння енергії газового потоку. Зверніть увагу на те, що швидкість передачі імпульсу тиску рівна швидкості поширення звуку в даному середовищі. Тому при певних співвідношеннях тисків на вході і на виході із сопла швидкість потоку залишається постійною і рівною швидкості поширення звуку в даному середовищі. Таке співвідношення тисків називається критичним і залежить від природи тіла. Необхідно також уявити принципову різницю між дроселюванням і адіабатним витіканням газу.

Література: [1]-72-80; [2]-15-17; [3]-153-167.

Дроселювання газів і водяної пари. (2 год.) Характеристика процесу дроселювання. Дроселювання реальних газів. Диференціальний і інтегральний дросель ефект Температура і точка інверсії Практичне використання процесів дроселювання. Розрахунок процесів дроселювання водяної пари з використанням  $h-s$  діаграми.

Література: [1]-80-85; [2]-44-53; [3]-264-267.

ТЕМА 7. Паливо і процеси горіння палива. (2 год.) Характеристика палива, способи задання робочого складу палива. Основні положення теорії горіння палива. Особливості горіння палива різних видів. Витрати повітря на процес горіння. Загальна кількість продуктів згорання. Визначення ентальпії продуктів згорання і температури горіння.

Література: [1]-190-215; [2]-180-196.

ТЕМА 8. Термодинамічні цикли паросилових установок. (2 год.) Цикл Ренкіна для ПСУ. Схема циклу Ренкіна і зображення її в  $p-v$  і  $T-s$  координатах. Визначення основних процесів циклу Ренкіна. Термічний к.к.д. циклу. Методи підвищення термічного к.к.д. циклу. Цикл з вторинним перегрівом пари, регенераційний, теплофікаційний цикли ПСУ

Методичні вказівки

Потрібно звернути увагу на те, чому цикл Карно не використовується для водяної пари, вияснити, які переваги має

використання водяної пари як робочого середовища, шляхи підвищення ККД циклу Ренкіна.

Література: [1]-108-118; [2]-69-76, [3]-277-289.

ТЕМА 9. Ідеальні цикли холодильних машин. (2 год.) Ідеальна холодильна установка, яка використовує цикл Карно. Повітряна холодильна установка. Компресійна парова холодильна установка. Пароструминна холодильна установка. Тепловий насос, і термохімічні перетворювачі теплоти.

Методичні вказівки

Для холодильних машин також еталонним є цикл Карно. Термічний коефіцієнт

корисної дії циклу Карно визначається за формулою:

$$\eta_t = 1 - T_{\min} / T_{\max},$$

де  $T_{\min}$  – мінімальна температура термодинамічної системи;

$T_{\max}$  – максимальна температура гарячого джерела.

Холодильний коефіцієнт  $\epsilon = (T_{\max} - T_{\min}) / T_{\min}$  може бути більшим від одиниці.

Література: [1]-125-133; [3]-295-315.

ТЕМА 10. Ідеальні цикли теплових машин. (2 год.) Схема ГТУ і зображення циклу ГТУ в  $p-v$  і  $T-s$  координатах. Основні процеси циклу ГТУ «відкритого» типу. Термічний к.к.д. циклу ГТУ. Переваги і недоліки ГТУ «відкритого» типу, її практичне використання. Схема поршневого одноступеневого компресора. Зображення процесів стиснення в  $p-v$  і  $T-s$  координатах. Визначення роботи стиснення в різних процесах.

Література: [1]-104-108, [2]-62-96.

ТЕМА 12. Методи термодинамічного аналізу енерготехнологічних систем.

(2 год.) Методи оцінки ефективності енерготехнологічних систем. Енергетичний, ентропійний і ексергічний методи. Використання вторинних енергоресурсів.

Література: [3]-316-334; [4]-68-81, 315-324.

# ПЕРЕЛІК ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ З КУРСУ «ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕПЛОТЕХНІКИ»

№ п/п	Назва лаборатроної роботи	№ лаб.роб	К-сть год	Література
1.	Техніка безпеки при виконанні лабораторних робіт. Вимірювання температури за допомогою термопари.	2	4	Методичні вказівки до л. р. №2
2.	Визначення коефіцієнта теплопровідності твердих тіл.	1	2	Методичні вказівки до л. р. №1
3.	Тепловіддача горизонтальної труби при вільному русі повітря.	6	2	Методичні вказівки до л. р. №6
4.	Визначення коефіцієнта теплопередачі теплообмінника.	5	2	Методичні вказівки до л. р. №5
5.	Дослідження процесу адіабатного витікання газу із сопла.	3	2	Методичні вказівки до л. р. №3
6.	Дослідження параметрів одноступеневого компресора.	4	2	Методичні вказівки до л. р. №4
7.	Вивчення процесів у вологому повітрі.	8	4	Методичні вказівки до л. р. №8
	ВСЬОГО	7	18	

## ОСНОВНА ЛІТЕРАТУРА

- 1.Швец И.Т. и др. Теплотехніка. Изд. «Вища школа», 1976, 520с.
- 2.Баскаков А.П. и др. Общая теплотехника. М-Л, 1963, 392с.
- 3.КрутовВ.И. Техническая термодинамика. М., Высшая школа, 1971, с. 471.

- 4.Чечеткин А В, Занемонец Н А . Теплотехника, М., Высшая школа, 1986, с. 336.
- 5.Б.Х. Драганов, А.А. Долинський та ін. "Теплотехніка ", ІНКОС , 2005. 503с.
- 6.Теплотехніка: Підручник./О.Ф.Буляндра та ін. – К.: «Вища школа», 1988, - 334с.
- 7.Шинкарик М.М. Теоретичні основи теплотехніки. – Тернопіль, вид. ТДТУ ім.І.Пулля, 2002. – с. 39-45.
- 8.Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е. – М.: «Энергия», 1977, - 334с.

#### ДОДАТКОВА ЛІТЕРАТУРА

1. Андреев Л.П., Костенко Г.М. та ін. Задачник з основ теплотехніки. Київ: Техніка, 1967, с. 343.
2. Костенко Г.М., Козак Н.Б. та інш. Задачник з теоретичних основ теплотехніки, Київ: Техніка, 1961, с. 343.
3. Сапронов А.Г., Благушин Б.М. Тепловые процессы и теплоиспользующее оборудование. Москва, Легпромбыгиздат, 1990, с.431.
4. Кузовлев В.А. Техническая термодинамика и основы теплопередачи. М., Высшая школа, 1983, с. 334.
5. Баскаков А.П. и др. Теплотехника. М., Энергоиздат, 1982, 264с.
6. Ильченко О.Т. Теплоиспользующие установки промышленных предприятий. Харьков, Высшая школа, 1985.

## ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧ

### Приклад розв'язування задачі №1.

Стальна труба маслоохолоджувача з внутрішнім діаметром  $d_1 = 30$  мм, зовнішнім  $d_2 = 40$  мм і коефіцієнтом теплопровідності  $\lambda_1 = 50$  Вт/(м·К) покрита ззовні шаром шламу товщиною  $\delta_o = 4$  мм., коефіцієнт теплопровідності якого  $\lambda_2 = 0,29$  Вт/(м·К). Температура масла  $t_{p1} = 100^\circ\text{C}$ . Коефіцієнт тепловіддачі від масла до поверхні шламу  $\alpha_1 = 150$  Вт/м<sup>2</sup>·К, а від поверхні труби до рідини  $\alpha_2 = 2000$  Вт/м<sup>2</sup>·К.

Визначити коефіцієнт теплопередачі від масла до рідини.

*Р о з в ' я з о к.* Коефіцієнт теплопередачі через двохшарову циліндричну стінку визначається за формулою:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 d_3}} \quad (1.1.)$$

де

$$d_3 = d_2 + 2\delta_o = 40 + 2 \cdot 4 = 48 \text{ мм.} \quad (1.2.)$$

Отже, підставивши дані у формулу, отримаємо:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{150 \cdot 0,03} + \frac{1}{2 \cdot 50} \ln \frac{0,04}{0,03} + \frac{1}{2 \cdot 0,29} \ln \frac{0,048}{0,04} + \frac{1}{2000 \cdot 0,048}} = 1,75 \text{ Вт/м}^\circ\text{C}$$

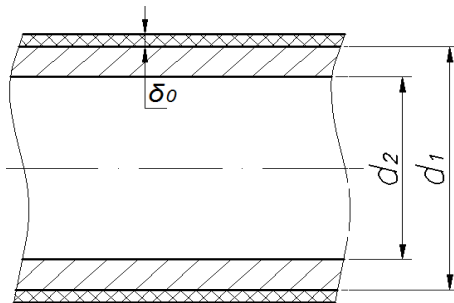


Рисунок 1.1. – Схема процесу теплопередачі.

### Приклад розв'язування задачі №2.

Труба довжиною 1 м і зовнішнім діаметром  $d = 25$  мм обтікається поперечним потоком повітря з температурою  $t_n = 20^\circ\text{C}$  і швидкістю  $\omega = 5$  м/с. Температура поверхні труби підтримується постійною і рівною  $t_c = 100^\circ\text{C}$ . Ступінь чорноти труби  $\varepsilon_c = 0,054$ .

Визначити значення середнього коефіцієнта тепловіддачі і тепловий потік, який віддається трубою в повітря.

*Розв'язок.* З таблиці «Теплофізичні коефіцієнти сухого повітря» (додаток №3) вибираємо параметри повітря при температурі  $t_n = 20^\circ\text{C}$ :  $\lambda_n = 2,6 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$ ,  $\nu_n = 15,06 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Коефіцієнт тепловіддачі горизонтальної труби можна визначити за формулою:

$$\text{Nu} = \alpha d / \lambda, \text{ звідки } \alpha = \text{Nu}_n \lambda_n / d \quad (2.1.)$$

Відомо, що для повітря  $\text{Nu}_n = 0,49 \text{Re}_n^{0,5}$  при  $\text{Re}_n < 1000$  та  $\text{Nu}_n = 0,245 \text{Re}_n^{0,6}$  при  $\text{Re}_n > 1000$  [8].

Визначимо критерій Рейнольдса для нашого випадку:

$$\text{Re}_n = \omega \cdot d / \nu_n = 5 \cdot 0,025 / 15,06 \cdot 10^{-6} = 8,3 \cdot 10^3 \quad (2.2.)$$

Отже:

$$\alpha = \text{Nu}_n \lambda_n / d = 0,245 \text{Re}_n^{0,6} \cdot \lambda_n / d, \quad (2.3.)$$

$$\alpha = 0,245 \cdot (8,3 \cdot 10^3)^{0,6} \cdot 2,6 \cdot 10^{-2} / 0,025 = 57,23 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Тепловий потік:

$$Q = Q_n + Q_k = \varepsilon_n \cdot C_0 \cdot F ((T_c/100)^4 - (T_n/100)^4) + \alpha \cdot F (t_c - t_{\text{пов.}}), \quad (2.4.)$$

$$Q = 0,054 \cdot 5,67 \cdot 0,079 ((373/100)^4 - (293/100)^4) + 57,23 \cdot 0,079 \cdot 80 = 364,6 \text{ Дж.}$$

де  $F = \pi \cdot d \cdot l = 3,14 \cdot 0,025 \cdot 1 = 0,079 \text{ м}^2$  – площа поверхні труби;

$\varepsilon_n = \varepsilon_0 \cdot 1,2 = 0,045 \cdot 1,2 = 0,054$  – степінь чорноти поверхні;

$C_0 = 5,67 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$  – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла.

Приклад розв'язування задачі №3

Визначити втрати теплоти за одиницю часу з 1 м довжини горизонтально розташованої циліндричної труби, що охолоджується вільним потоком повітря, якщо температура стінки труби  $t_c = 100^\circ\text{C}$ , температура повітря в приміщенні  $t_{\text{пов.}} = 20^\circ\text{C}$  а діаметр труби  $d = 200 \text{ мм}$ . Ступінь чорноти труби  $\varepsilon_c = 0,9$ .

*Р о з в ' я з о к.* З таблиці «Теплофізичні коефіцієнти сухого повітря» (додаток №3) вибираємо параметри повітря при температурі  $t_n = 20^\circ\text{C}$ :  $\lambda_n = 2,6 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$ ,  $\nu_n = 15,06 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $\text{Pr}_n = 0,703$ . (додаток №3)

Втрата теплоти  $Q$  буде дорівнювати сумі променистого та конвективного теплових потоків:

$$Q = Q_n + Q_k. \quad (3.1.)$$

Променистий тепловий потік, який передається від труби за рахунок теплового випромінювання, знайдемо за формулою:

$$Q_n = \varepsilon_c \cdot C_0 \cdot F \cdot ((T_c/100)^4 - (T_n/100)^4) =$$

$$0,9 \cdot 5,67 \cdot 0,628 \cdot ((373/100)^4 - (293/100)^4) = 384,17 \text{ Дж} \quad (3.2.)$$

де  $F = \pi \cdot d \cdot l = 3,14 \cdot 0,2 \cdot 1 = 0,628 \text{ м}^2$  – площа поверхні труби;

$C_0 = 5,67 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{K}$  – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла.

Конвективний тепловий потік:

$$Q_k = \alpha \cdot F(t_c - t_{\text{пов.}}), \quad (3.3.)$$

Коефіцієнт тепловіддачі горизонтальної труби можна визначити за формулою:

$$\text{Nu} = \alpha d / \lambda, \text{ звідки } \alpha = \text{Nu}_n \lambda_n / d \quad (3.4.)$$

Критерій Нуссельта знайдемо із узагальненої критеріальної формули для розрахунку теплообміну при вільній конвекції у великому об'ємі [8]:

$$\text{Nu}_n = c(\text{Gr}_n \text{Pr}_n)^n \quad (3.5.)$$

Спочатку визначимо критерій Гразгофа:

$$\text{Gr}_n = \beta d^3 g(t_c - t_{\text{пов.}}) / \nu_n^2 \quad (3.6.)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт об'ємного розширення,  $1/^\circ\text{K}$

$$\beta = 1/T_m = 1/(t_m + 273) = 1/(60 + 273) = 3 \cdot 10^{-3} \text{ } 1/^\circ\text{K} \quad (3.7.)$$

$t_m$  – середня температура пограничного шару:  $t_m = (t_c + t_{\text{пов.}})/2$ .

Підставимо отримані значення у формулу (3.6.):

$$\text{Gr}_n = 3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,2^3 \cdot 9,81(100-20)/(15,06 \cdot 10^{-6})^2 = 8,3 \cdot 10^7$$

Значення констант  $c$  та  $n$  визначимо за таблицею «Значення констант  $c$  і  $n$  при вільній конвекції для горизонтальної труби в залежності від режиму руху» (додаток 8) за добутком критеріїв  $\text{Gr}$  та  $\text{Pr}$ :

$$Gr_{\Pi}Pr_{\Pi} = 8,3 \cdot 10^7 \cdot 0,703 = 5,84 \cdot 10^7 \quad (3.8.)$$

Таким чином отримаємо значення констант:  $c = 0,54$ ,  $n = 0,25$

Підставимо отримані значення у формулу (3.5.):

$$Nu_{\Pi} = 0,54(8,3 \cdot 10^7 \cdot 0,703)^{0,25} = 47,2$$

Скористаємося формулою (3.4.) щоб знайти коефіцієнт тепловіддачі:

$$\alpha = 47,2 \cdot 2,6 \cdot 10^{-2} / 0,2 = 6,14 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$$

Визначимо втрати теплоти за рахунок конвекції за формулою (3.3.):

$$Q_k = 6,14 \cdot 0,628(100 - 20) = 308,47 \text{ Дж}.$$

Підставимо отримані значення у формулу (3.1.) та визначимо втрати теплоти:

$$Q = Q_{\Pi} + Q_k = 384,17 + 308,47 = 692,65 \text{ Дж}.$$

#### Приклад розв'язування задачі №4

Визначити поверхню нагріву рекуперативного газоповітряного теплообмінника при протічній і протічній схемах руху теплоносія, якщо об'ємна витрата повітря, що нагрівається при нормальних умовах  $V_n = 1 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{год.}$ , середній коефіцієнт теплопередачі від продуктів згорання до повітря  $K = 20 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ , початкові і кінцеві температури продуктів згорання і повітря відповідно  $t'_1 = 500^\circ\text{C}$ ,  $t''_1 = 300^\circ\text{C}$ ,  $t'_2 = 30^\circ\text{C}$ ,  $t''_2 = 200^\circ\text{C}$ .

*Розв'язок.* Зобразимо графіки зміни температур теплоносіїв для обох випадів.

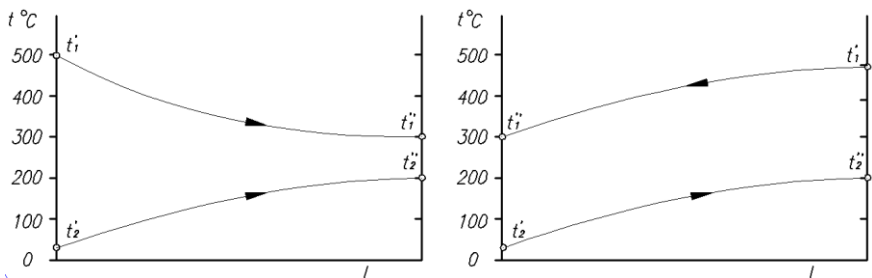


Рисунок 4.1. - Графіки зміни температур теплоносіїв при протічній (зліва) та протічній (з права) схемах руху теплоносія.

Визначимо середній логарифмічний температурний напір при протічній схемі руху теплоносія:



$$\Delta t_{\text{сер}} = \frac{(t'_1 - t'_2) - (t''_1 - t''_2)}{\ln \frac{t'_1 - t'_2}{t''_1 - t''_2}} = \frac{(500-30) - (300-200)}{\ln \frac{(500-30)}{(300-200)}} = 239,1 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (4.1.)$$

при протитечійній схемі руху теплоносія:

$$\Delta t'_{\text{сер}} = \frac{(t'_1 - t'_2) - (t''_1 - t'_2)}{\ln \frac{t'_1 - t'_2}{t''_1 - t'_2}} = \frac{(500-200) - (300-30)}{\ln \frac{(500-200)}{(300-30)}} = 284,7 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (4.2.)$$

Знайдемо за таблицею «Теплофізичні коефіцієнти сухого повітря при  $p = 100 \text{ кН/м}^2$ » (додаток 3) теплоємність повітря при середній температурі повітря  $t_c = (t'_2 + t''_2)/2 = 115 \text{ } ^\circ\text{C}$ :

$$C = 1,009 \text{ кДж/кг } ^\circ\text{C};$$

Знайдемо кількість теплоти, що передається від продуктів згоряння до повітря:

$$Q = G_{\text{п}} c_{\text{п}} (t''_1 - t'_2) = 890 \cdot 1,009 (200 - 30) = 153 \text{ кДж} \quad (4.3.)$$

де  $G_{\text{п}} = V_{\text{п}} \cdot \rho = 1000 \cdot 0,89 = 890 \text{ кг}$  – масовий розхід повітря;  $\rho = 0,89 \text{ кг/м}^3$  – за таблицею (додаток 3).

Визначимо площу поверхні нагріву для прямиотечійної схеми руху теплоносія:

$$F = Q/K \cdot \Delta t_{\text{сер}} = 1,53 \cdot 10^5 / 20 \cdot 239,1 = 32 \text{ м}^2. \quad (4.4.)$$

Для протитечійної схеми руху теплоносія площа поверхні нагріву дорівнює:

$$F' = Q/K \cdot \Delta t'_{\text{сер}} = 1,53 \cdot 10^5 / 20 \cdot 284,7 = 26,9 \text{ м}^2.$$

Таким чином, ми встановили, що при протитечійній схемі руху теплоносія площа поверхні нагріву буде меншою ніж при прямиотечійній.

Приклад розв'язування задачі 5.

Стінка нагрівальної пічки виконана з трьох шарів: вогнетривкої цегли товщиною  $\delta_1 = 120 \text{ мм}$  (коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_1 = 0,9 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ) червоної цегли товщиною  $\delta_2 = 250 \text{ мм}$  ( $\lambda_2 = 0,7 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ) і зовнішнього ізоляційного шару шлаковати товщиною  $\delta_3 = 90 \text{ мм}$  ( $\lambda_{i3} = 0,04 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ ) Температура газів в пічці  $t_r = 130 \text{ } ^\circ\text{C}$ , температура повітря в цеху  $t_p = 22 \text{ } ^\circ\text{C}$  Коефіцієнт тепловіддачі від газів в пічці до стінки  $\alpha_1 = 120 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$  і від ізоляції до повітря  $\alpha_2 = 23$ .

Визначити втрати тепла через стінку пічки і температури на поверхні шарів. Зобразити схематично розподіл температури по товщині стінки.

*Р о з в ' я з о к.* Визначимо термічні опори стінок та ізоляції за формулою:

$$R = \delta/\lambda \quad (5.1.)$$

Отже:

$$R_{\text{ст1}} = \delta_1/\lambda_1 = 0,12/0,9 = 0,133 \text{ K}/(\text{Вт}\cdot\text{м}^2);$$

$$R_{\text{ст2}} = \delta_2/\lambda_2 = 0,25/0,7 = 0,357 \text{ K}/(\text{Вт}\cdot\text{м}^2);$$

$$R_{\text{із}} = \delta_{\text{із}}/\lambda_{\text{із}} = 0,09/0,04 = 2,25 \text{ K}/(\text{Вт}\cdot\text{м}^2);$$

Питомий тепловий потік через стінку:

$$Q = (t_{\text{г}} - t_{\text{п}})/(1/\alpha_1 + R_{\text{ст1}} + R_{\text{ст2}} + R_{\text{із}} + 1/\alpha_1) = (130 - 22)/(1/120 + 0,133 + 0,357 + 2,25 + 1/23) = 38,68 \text{ Вт}/\text{м}^2. \quad (5.2.)$$

Визначимо температури стінок.

Температура на внутрішній поверхні шару вогнетривкої цегли становить:

$$t_{\text{вн}} = t_{\text{г}} - q/\alpha_1 = 130 - 38,68/120 = 129,68^\circ \text{C}. \quad (5.3.)$$

Температура між шарами вогнетривкої та червоної цегли:

$$t_1 = t_{\text{вн}} - q \cdot R_{\text{ст1}} = 129,68 - 38,68 \cdot 0,133 = 124,52^\circ \text{C}. \quad (5.4.)$$

Температура на контакті шару червоної цегли та шару ізоляції:

$$t_2 = t_1 - q \cdot R_{\text{ст2}} = 124,52 - 38,68 \cdot 0,357 = 110,707^\circ \text{C}.$$

Температура на зовнішній поверхні шару ізоляції:

$$t_{\text{із}} = t_2 - q \cdot R_{\text{із}} = 110,707 - 38,68 \cdot 2,25 = 23,682^\circ \text{C}.$$

Перевірка:

$$t_{\text{зовн.}} = t_{\text{п}} + q/\alpha_2 = 22 + 38,68/23 = 23,682^\circ \text{C}.$$

Отже, розрахунки виконано вірно.

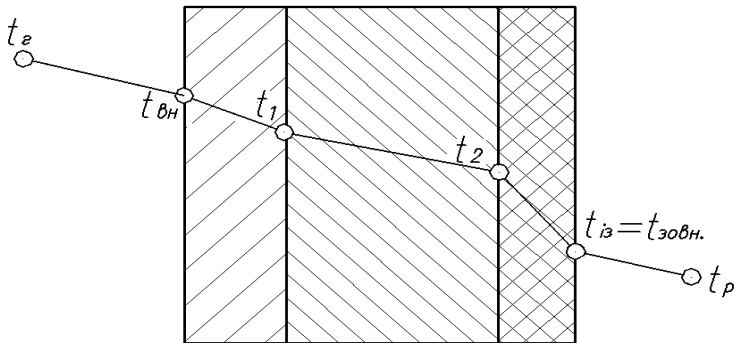


Рисунок 2. – Схема розподілу температури по товщині стінки.

Приклад розв'язування задачі 5.

Яку температуру має кисень, стиснутий в балоні об'ємом 240 л. до тиску 0,7 МПа., якщо маса цього кисню 2 кг.

*Розв'язок.* Скористаємося рівнянням стану:

$$PV = mRT, \quad (6.1.)$$

звідки

$$T = PV/mR.$$

Відомо, що при нормальних умовах газова стала визначається за формулою:

$$R = P_n V_n / T_n = P_n / T_n \rho_n \quad (6.2.)$$

де  $P_n = 101\,325$  Па – тиск при нормальних умовах;

$T_n = 273^\circ\text{К}$  – температура при нормальних умовах;

$\rho_n$  – густина при нормальних умовах. Для кисню  $\rho_n = 1,429$  кг/м<sup>3</sup>.  
(додаток 7 «Молекулярна вага та густина деяких газів при нормальних технічних умовах»).

Отже:

$$R = 101325 / 273 \cdot 1,429 = 259,7.$$

Підставимо отримані дані у рівняння стану:

$$T = PV/mR = 0,7 \cdot 10^6 \cdot 0,24 / 2 \cdot 259,7 = 323,5^\circ\text{К}$$

$$t = T - 273 = 323,5 - 273 = 50,5^\circ\text{С}.$$

Приклад розв'язування задачі 6.

Задано стан пари: тиск  $P=1,6$  МПа, ступінь сухості  $x = 0,96$ .  
Визначити решту параметрів, використовуючи  $h_s$  діаграму.

*Розв'язок.* На  $h$ - $s$  діаграмі знаходимо точку А (рисунок 2), яка характеризує даний стан на перетині ізобари  $p = 1,6$  МПа і ступеня сухості  $x = 0,96$ . Отримана точка знаходиться в області вологої насиченої пари.

Проектуючи точку А на осі ординат і абсцис знаходимо  $h_x=2716$  кДж/кг.,  $s_x=6,26$  кДж/кг. $^\circ\text{К}$ . Значення питомого об'єму визначається за ізохорою, яка проходить через точку А (чисельні значення на лінії  $x=1$ ):  $v_x=0,12$  м<sup>3</sup>/кг. Для визначення температури від точки А піднімаємось по ізобарі  $P=0,6$  МПа до лінії  $x=1$  (точка В). через цю точку проходить ізотерма  $t=202^\circ\text{С}$ .

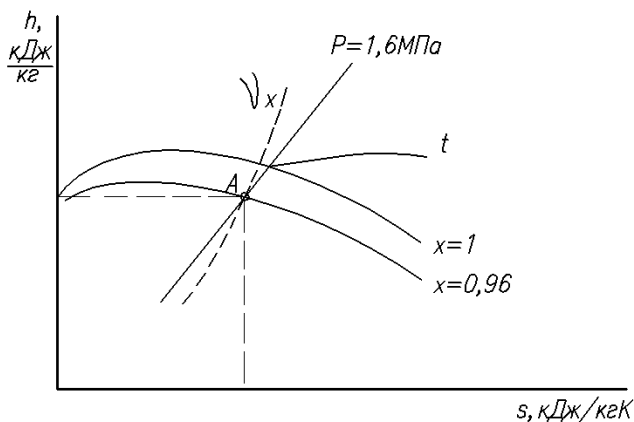


Рисунок 2.

Приклад розв'язування задачі 7.

З парового котла в пароперегрівач поступає 2700 кг/год пари при тиску

$P=1,5$  МПа і ступені сухості  $x=0,98$ . Температура пари після пароперегрівача рівна  $400^{\circ}\text{C}$ .

Визначити кількість тепла, яке пара одержує в пароперегрівачі.

**Р о з в ' я з о к.** Знаходимо на  $h$ - $s$  діаграмі початкову точку 1 на перетині ліній  $x=0,98$  і  $P=1,5$  МПа. Процес нагрівання проходить при постійному тиску. Проводимо ізобару до перетину з ізотермою  $t=400^{\circ}\text{C}$  (точка 2). Це буде кінцева точка процесу.

Згідно першого закону термодинаміки

$$\Delta q = dh - vdp, \quad (7.1.)$$

тому для процесу, який проходить при постійному тиску

$$\Delta q = \Delta h. \quad (7.2.)$$

Визначаємо за  $h$ - $s$  діаграмою ентальпію в точках 1 і 2:

$$h_1 = 2754,6 \text{ кДж/кг};$$

$$h_2 = 3253 \text{ кДж/кг}.$$

Загальна кількість теплоти

$$Q = G(h_2 - h_1) = 2700(3253 - 2754,6) = 1345680 \text{ кДж/год}. \quad (7.3.)$$

Приклад розв'язування задачі №8

Визначити, за допомогою  $h$ - $d$  діаграми, вологовміст повітря при температурі  $25^{\circ}\text{C}$  і відносній вологості  $\phi = 80\%$ .

*Розв'язок.* Знаходимо на Н-d діаграмі точку на перетині ліній  $t = 25^\circ\text{C}$  і  $\varphi = 80\%$  (рисунок 3). Для визначення вологовмісту опускаємо перпендикуляр на вісь ординат. Вологовміст  $d = 16 \text{ г/кг с.пов.}$

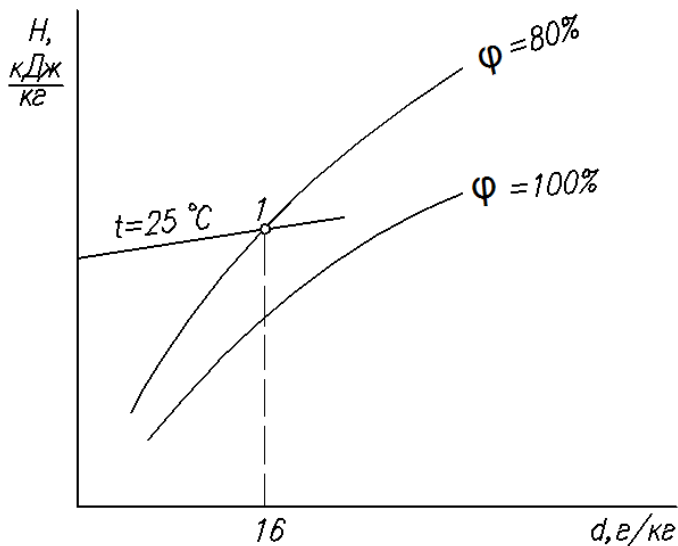


Рисунок 3.

#### Приклад розв'язування задачі №9

Визначити за допомогою Н-d діаграми кількість теплоти, яку необхідно затратити на нагрів повітря від початкової температури  $20^\circ\text{C}$  і відносної вологості  $\varphi = 80\%$  до температури  $60^\circ\text{C}$ .

*Розв'язок.* На Н-d діаграмі (рисунок 4) знаходимо точку 1 на перетині ліній  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  і  $\varphi = 80\%$ . Процес нагріву на діаграмі зображений лінією яка направлена вертикально вгору до перетину з лінією  $t_2 = 60^\circ\text{C}$  (т. 2), оскільки вологовміст повітря в процесі нагріву залишається постійним.

Кількість теплоти, яка необхідна для нагріву, можна визначити як різницю ентальпій в точці 1 і точці 2, відповідно  $H_1 = 63 \text{ кДж/кг}$ ,  $H_2 = 98 \text{ кДж/кг}$

$$Q = H_2 - H_1 = 98 - 63 = 36 \text{ кДж/кг.} \quad (8.1.)$$

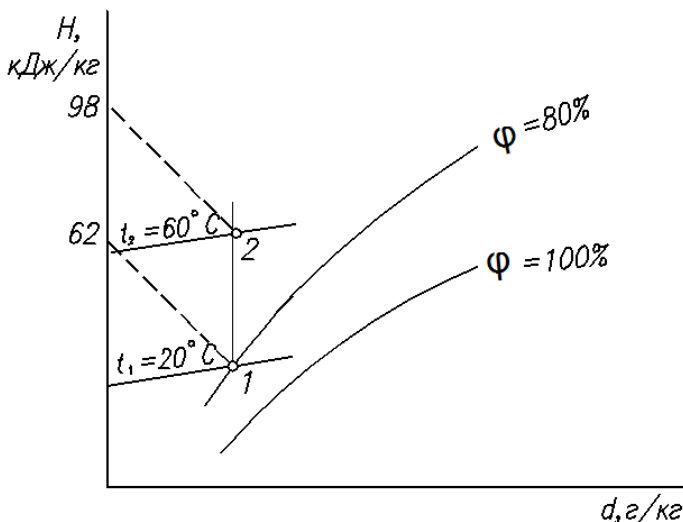


Рисунок 4.

### ЗАДАЧІ

Задача 1. Стальна труба маслоохолоджувача з внутрішнім діаметром  $d_1=32$  мм, зовнішнім  $d_2 = 40$  мм і коефіцієнтом теплопровідності  $\lambda_1= 50$  Вт/(м·К) покрита ззовні шаром шламу товщиною  $\delta_o$ , коефіцієнт теплопровідності якого  $\lambda_o= 0,29$  Вт/(м·К). Температура масла  $t_{p1}$ , а температура охолоджуючої рідини в середині  $t_{p2}$ . Коефіцієнт тепловіддачі від масла до поверхні шламу  $\alpha_1$ , а від поверхні труби до рідини  $\alpha_2$ .

Визначити коефіцієнт теплопередачі від масла до рідини.

Дані до задачі взяти з таблиці 1.

Таблиця 1.

Остання цифра шифру	$\alpha_1$ Вт/м·К	$\delta_o$ , мм	$t_{p1}$ , °С	Передостання цифра шифру	$\alpha_2$ Вт/м·К	$t_{p2}$ , °С
0	100	4	115	0	2300	15
1	120	3	120	1	2500	20
2	150	4	125	2	2800	15
3	160	5	130	3	3000	30
4	170	6	127	4	3300	25
5	130	7	123	5	3500	35

6	110	3	132	6	3200	30
7	140	4	122	7	2000	25
8	180	5	115	8	2200	20
9	150	4	110	9	2100	15

Задача 2. Труба довжиною  $l$  і зовнішнім діаметром  $d$  обтікається поперечним потоком повітря з температурою  $t_n$  і швидкістю  $\omega$ . Температура поверхні труби підтримується постійною і рівною  $t_c$ .

Визначити значення середнього коефіцієнта тепловіддачі і тепловий потік, який віддається трубою в повітря. Як зміниться величина теплового потоку, якщо труба буде обтікатися повздовжнім потоком повітря? Дані до задачі взяти з таблиці 2.

Таблиця 2.

Остання цифра шифру	$d$ , мм	$t_n$ , °C	$\omega$ , м/с	Передостання цифра шифру	$t_c$ , °C	$l$ , м
0	20	18	12	0	70	1,5
1	25	15	10	1	75	1,8
2	28	20	8	2	80	2,0
3	32	25	6	3	85	2,4
4	36	28	5	4	90	2,6
5	40	10	4	5	65	2,8
6	44	5	3	6	60	3,0
7	48	22	7	7	70	3,2
8	35	18	9	8	90	3,4
9	45	28	8	9	100	3,8

Задача 3. Визначити втрати теплоти за одиницю часу з  $l$  м довжини горизонтально розташованої циліндричної труби, що охолоджується вільним потоком повітря, якщо температура стінки труби  $t_c$ , температура повітря в приміщенні  $t_{пов}$ , а діаметр труби  $d$ . Ступінь чорноти труби  $\varepsilon_c = 0,9$ . Дані, необхідні для розв'язку задачі взяти з таблиці 3.

Таблиця 3.

Остання цифра шифру	d, мм	Предостання цифра шифру	t <sub>c</sub> , °C	t <sub>пов.</sub> , °C	Остання цифра шифру	d, мм	Предостання цифра шифру	t <sub>c</sub> , °C	t <sub>пов.</sub> , °C
0	220	0	150	15	5	270	5	100	20
1	230	1	140	20	6	300	6	190	15
2	210	2	130	25	7	320	7	180	10
3	240	3	120	35	8	340	8	170	5
4	250	4	110	25	9	360	9	160	0

Задача 4. Визначити поверхню нагріву рекуперативного газоповітряного теплообмінника при прямотечійній і протитечійній схемах руху теплоносія, якщо об'ємна витрата повітря, що нагрівається при нормальних умовах  $V_n$ , середній коефіцієнт теплопередачі від продуктів згорання до повітря  $K$ , початкові і кінцеві температури продуктів згорання і повітря відповідно  $t'_1$ ,  $t''_1$ ,  $t'_2$  і  $t''_2$ . Дані необхідні для вирішення задачі, вибрати із таблиці 4.

Таблиця 4.

Остання цифра шифру	$10^3 \cdot V_n$ , м <sup>3</sup> /год	$k$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	Предостання цифра шифру	$t'_1$ , °C	$t''_1$ , °C	$t'_2$ , °C	$t''_2$ , °C
0	1	18	0	600	400	20	300
1	2	19	1	625	425	15	325
2	3	20	2	650	450	25	350
3	4	21	3	675	475	30	375
4	5	22	4	700	500	10	400
5	6	23	5	725	525	12	425
6	7	24	6	750	550	18	450
7	8	25	7	775	575	28	475
8	9	26	8	800	600	32	500
9	10	27	9	575	375	8	275



Задача 5. Стінка нагрівальної пічки виконана з трьох шарів: вогнетривкої цегли товщиною  $\delta_1 = 120$  мм (коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_1 = 0,9$  Вт/м·К) червоної цегли товщиною  $\delta_2 = 250$  мм ( $\lambda_2 = 0,7$  Вт/м·К) і зовнішнього шару ізоляції товщиною  $\delta_b$ . Температура газів в пічці  $t_{г1}$ , температура повітря в цеху  $t_{р2}$ . Коефіцієнт тепловіддачі від газів в пічці до стінки  $\alpha_1$  і від ізоляції до повітря  $\alpha_2$ .

Визначити втрати тепла через стінку пічки і температури на поверхні шарів. Зобразити схематично розподіл температури по товщині стінки.

Дані до задачі взяти з таблиці 1.

Таблиця 1.

Остання цифра шифру	Матеріал ізоляції	$\delta_b$ , мм	$t_{г1}$ , °С	$\alpha_2$ Вт/м <sup>2</sup> К	Передостання цифра шифру	$t_{р1}$ , °С	$\alpha_2$ Вт/м <sup>2</sup> К
0	Шлаковата	90	110	140	0	20	16
1	Скловата	40	115	130	1	24	18
2	Азбест	80	100	160	2	28	20
3	Шлаковата	90	130	120	3	25	22
4	Новоазбозурит	70	110	140	4	30	24
5	Азбозурит	100	125	150	5	27	21
6	Совелит	60	105	125	6	29	17
7	Азбест	85	120	135	7	22	23
8	Шлаковата	95	112	145	8	26	19
9	Скловата	50	110	150	9	25	15

Задача 5. Яку температуру має кисень, стиснутий в балоні об'ємом  $V$  до тиску  $P$ , якщо маса цього кисню 2 кг. Дані необхідні для вирішення задачі, вибрати із таблиці 5.

Таблиця 5.

Остання цифра шифру	об'єм балону V, л.	Предостання цифра шифру	Тиск P, МПа.
0	200	0	0,70
1	210	1	0,75
2	220	2	0,80
3	230	3	0,85
4	240	4	0,90
5	250	5	0,95
6	260	6	1,00
7	270	7	1,05
8	280	8	1,10
9	290	9	1,15

Задача 6. Задано стан пари: тиск  $P$ , ступінь сухості  $x$ . Визначити решту параметрів, використовуючи  $h$ - $s$  діаграму. Дані, необхідні для розв'язку задачі взяти з таблиці 6.

Таблиця 6.

Остання цифра шифру	Тиск P, МПа	Предостання цифра шифру	Степінь сухості $x$
0	0,5	0	0,85
1	1,0	1	0,86
2	1,5	2	0,87
3	2,0	3	0,88
4	2,5	4	0,89
5	3,0	5	0,90
6	3,5	6	0,91
7	4,0	7	0,92
8	4,5	8	0,93
9	5,0	9	0,94

Задача 7. З парового котла в пароперегрівач поступає 2700 кг/год пари при тиску  $P$  і ступені сухості  $x$ . Температура пари після пароперегрівача рівна  $t$ . Дані, необхідні для розв'язку задачі взяти з таблиці 7.

Таблиця 7.

Остання цифра шифру	Тиск P, МПа	Предостання цифра шифру	Температура t, °C	Степінь сухості x
0	5,0	0	300	0,85
1	4,5	1	310	0,86
2	4,0	2	320	0,87
3	3,5	3	330	0,88
4	3,0	4	340	0,89
5	2,5	5	350	0,90
6	2,0	6	360	0,91
7	1,5	7	370	0,92
8	1,0	8	380	0,93
9	0,5	9	390	0,94

Задача 8. Визначити, за допомогою H-d діаграми, вологовміст повітря при температурі  $t$  і відносній вологості  $\phi$ . Дані, необхідні для розв'язку задачі взяти з таблиці 8.

Таблиця 8.

Остання цифра шифру	t, °C	Предостання цифра шифру	$\phi$ , %	Остання цифра шифру	t, °C	Предостання цифра шифру	$\phi$ , %
0	10	0	100	5	35	5	65
1	15	1	95	6	40	6	60
2	20	2	80	7	45	7	55
3	25	3	75	8	50	8	50
4	30	4	70	9	55	9	45

Задача 9. Визначити за допомогою H-d діаграми кількість теплоти, яку необхідно затратити на нагрів повітря від початкової температури 20 °C і відносної вологості  $\phi$  до температури  $t_2$ . Дані, необхідні для вирішення задачі взяти з таблиці 9.

Таблиця 9.

Остання цифра шифру	t <sub>2</sub> , °C	Перед-остання цифра шифру	φ, %	Остання цифра шифру	t <sub>2</sub> , °C	Перед-остання цифра шифру	φ, %
0	30	0	100	5	55	5	65
1	35	1	95	6	60	6	60
2	40	2	80	7	65	7	55
3	45	3	75	8	75	8	50
4	50	4	70	9	75	9	45

## ДОДАТКИ

Додаток 1.- Суха насичена пара і вода на лінії насичення (за тисками).

p, МН/м <sup>2</sup>	t <sub>s</sub> , °C	v', м <sup>3</sup> /кг	v'', м <sup>3</sup> /кг	h', кДж/кг	h'', кДж/кг	g, кДж/кг	s', кДж/кг°C	s'', кДж/кг°C
0,0010	6,936	0,0010001	130,04	29,18	2513,4	2484,2	0,1053	8,9749
0,0015	13,001	0,0010007	88,38	54,61	2524,7	2470,1	0,1952	8,8268
0,0020	17,486	0,0010014	67,24	73,40	2533,1	2459,7	0,2603	8,7227
0,0025	21,071	0,0010021	54,42	88,36	2539,5	2451,1	0,3119	8,6424
0,0030	24,078	0,0010028	45,77	100,93	2545,3	2444,4	0,3547	8,5784
0,0035	26,674	0,0010035	39,56	111,81	2549,9	2438,1	0,3912	8,5222
0,0040	28,95	0,0010042	34,93	121,33	2553,7	2432,3	0,4225	8,4737
0,005	32,89	0,0010054	28,24	137,79	2560,9	2423,1	0,4764	8,3943
0,006	36,17	0,0010065	23,77	151,49	2567,1	2415,6	0,5209	8,3297
0,007	39,02	0,0010075	20,56	163,39	2571,8	2408,4	0,5588	8,2734
0,008	41,53	0,0010085	18,13	173,89	2576,4	2402,5	0,5919	8,2263
0,009	43,78	0,0010094	16,22	183,31	2580,5	2397,2	0,6222	8,1854
0,010	45,82	0,0010102	14,70	191,84	2583,9	2392,1	0,6496	8,1494
0,012	49,44	0,0010118	12,37	206,96	2590,6	2383,7	0,6966	8,0850
0,014	52,57	0,0010132	10,69	220,05	2596,1	2376,0	0,7368	8,0305
0,016	55,34	0,0010146	9,437	231,63	2601,1	2369,5	0,7722	7,9852
0,018	57,82	0,0010159	8,448	242,03	2605,4	2363,3	0,8040	7,9445
0,020	60,08	0,0010171	7,652	251,48	2609,2	2357,7	0,8324	7,9075
0,025	64,99	0,0010198	6,201	272,03	2617,6	2345,5	0,8934	7,8300
0,030	69,12	0,0010223	5,232	289,30	2624,6	2335,3	0,9441	7,7673
0,04	75,87	0,0010264	3,999	317,62	2636,3	2318,7	1,0261	7,6710
0,05	81,33	0,0010299	3,242	340,53	2645,2	2304,7	1,0912	7,5923
0,06	85,94	0,0010330	2,734	359,90	2653,1	2293,2	1,1453	7,5313
0,07	89,95	0,0010359	2,367	376,79	2659,8	2283,1	1,1920	7,4799
0,08	93,50	0,0010385	2,089	391,75	2665,3	2273,5	1,2331	7,4342
0,09	96,71	0,0010409	1,871	405,19	2670,2	2265,1	1,2699	7,3936
0,10	99,62	0,0010432	1,696	417,47	2674,9	2257,5	1,3026	7,3579
0,12	104,80	0,0010472	1,430	439,34	2683,0	2243,6	1,3610	7,2972
0,14	109,31	0,0010509	1,237	458,42	2690,1	2231,7	1,4109	7,2460
0,16	113,31	0,0010543	1,092	475,41	2696,3	2220,8	1,4550	7,2017

0,18	116,93	0,0010575	0,9782	490,68	2701,8	2211,1	1,4945	7,1628
0,20	120,23	0,0010606	0,8860	504,74	2706,8	2202,0	1,5306	7,1279
0,22	123,27	0,0010633	0,8103	517,7	2711,0	2193,3	1,5632	7,0953
0,24	126,09	0,0010659	0,7469	529,9	2714,9	2185,0	1,5931	7,0658
0,26	128,73	0,0010684	0,6929	541,2	2718,9	2177,7	1,6213	7,0399
0,28	131,20	0,0010709	0,6463	551,7	2722,3	2170,7	1,6471	7,0152
0,30	133,54	0,0010733	0,6055	561,7	2725,5	2163,9	1,6716	6,9922
0,35	138,87	0,0010787	0,5241	584,4	2732,3	2147,9	1,7276	6,9404
0,40	143,62	0,0010836	0,4623	604,6	2738,7	2134,1	1,7766	6,8969
0,45	147,92	0,0010883	0,4139	623,0	2743,9	2120,9	1,8204	6,8572
0,50	151,84	0,0010927	0,3749	640,1	2748,8	2108,7	1,8605	6,8221
0,60	158,84	0,0011009	0,3156	670,6	2756,9	2086,3	1,9311	6,7609
0,70	164,96	0,0011081	0,2728	697,2	2763,7	2066,5	1,9923	6,7090
0,80	170,41	0,0011149	0,2403	720,9	2769,0	2048,1	2,0461	6,6630
0,90	175,36	0,0011213	0,2149	742,7	2773,7	2031,0	2,0945	6,6223
1,0	179,88	0,0011273	0,1945	762,4	2777,8	2015,3	2,1383	6,5867
1,1	184,05	0,0011330	0,1775	781,3	2781,2	1999,9	2,1786	6,5523

Продовження додатку 1.

$p$ , МН/м <sup>2</sup>	$t_s$ , °C	$v'$ , м <sup>3</sup> /кг	$v''$ , м <sup>3</sup> /кг	$h'$ , кДж/кг	$g$ , кДж/кг	$s'$ , кДж/кг°C	$s''$ , кДж/кг°C
1,2	187,95	0,0011385	0,1633	798,4	1986,2	2,2156	6,5224
1,3	191,60	0,0011438	0,1512	814,6	1972,7	2,2510	6,4954
1,4	195,04	0,0011488	0,1408	830,0	1959,7	2,2841	6,4699
1,5	198,28	0,0011538	0,1317	844,5	1947,3	2,3148	6,4458
1,6	201,36	0,0011587	0,1238	858,3	1935,2	2,3437	6,4221
1,7	204,30	0,0011633	0,1167	871,7	1923,5	2,3712	6,4000
1,8	207,10	0,0011678	0,1104	884,2	1912,3	2,3975	6,3794
1,9	209,78	0,0011723	0,1048	896,6	1901,3	2,4224	6,3597
2,0	212,37	0,0011768	0,09961	908,6	1890,7	2,4471	6,3411
2,2	217,24	0,0011851	0,09069	930,9	1869,7	2,4923	6,3056
2,4	221,77	0,0011932	0,08324	951,8	1850,0	2,5346	6,2727
2,6	226,04	0,0012011	0,07687	971,9	1830,8	2,5734	6,2407
2,8	230,04	0,0012088	0,07142	990,2	1812,8	2,6101	6,2129
3,0	233,83	0,0012164	0,06663	1008,4	1794,7	2,6455	6,1859
3,5	242,54	0,0012344	0,05706	1049,8	1753,0	2,7251	6,1242
4,0	250,33	0,0012520	0,04977	1087,5	1713,2	2,7965	6,0689
5,0	263,91	0,0012858	0,03943	1154,2	1639,6	2,9210	5,9739
6,0	275,56	0,0013185	0,03243	1213,9	1570,5	3,0276	5,8894
7,0	285,80	0,0013510	0,02738	1267,6	1504,7	3,1221	5,8143
8,0	294,98	0,0013838	0,02352	1317,3	1441,2	3,2079	5,7448
9,0	303,31	0,0014174	0,02049	1363,9	1378,8	3,2866	5,6783
10,0	310,96	0,0014522	0,01803	1407,9	1316,9	3,3601	5,6147
11,0	318,04	0,0014886	0,01597	1450,2	1255,0	3,4297	5,5528
12,0	324,64	0,001527	0,01426	1491,1	1193,5	3,4966	5,4930
13,0	330,81	0,001568	0,01278	1531,3	1131,1	3,5606	5,4333
14,0	336,63	0,001611	0,01149	1570,8	1067,0	3,6233	5,3731
16,0	347,32	0,001710	0,009319	1649,6	932,1	3,7456	5,2478
18,0	356,96	0,001839	0,007505	1732,2	778,4	3,8708	5,1054
20,0	365,72	0,00203	0,00586	1826,8	583,4	4,0147	4,9280
22,0	373,71	0,00269	0,00378	2009,7	185,9	4,2943	4,5815

Додаток 2 - Теплофізичні коефіцієнти води на лінії насичення.

t, °C	$\rho$ , МН/м <sup>2</sup>	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/м·°C	c, кДж/кг·°C	$\alpha \cdot 10^6$ , м <sup>3</sup> /с	$\mu \cdot 10^3$ , Па·с	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$\beta \cdot 10^4$ , 1/°C	$\sigma \cdot 10^3$ , Н/м	Pr
0	0,000587	999,9	0,550	4,21	0,130	1,78	1,78	-0,63	75,6	13,7
10	0,00118	999,7	0,574	4,19	0,136	1,3	1,306	0,70	74,1	9,52
20	0,00235	998,2	0,594	4,185	0,143	1,0	1,006	1,82	72,6	7,02
30	0,00422	995,7	0,616	4,175	0,148	0,8	0,805	3,21	71,1	5,42
40	0,00735	992,2	0,633	4,175	0,153	0,654	0,659	3,87	69,6	4,31
50	0,0123	988,1	0,647	4,175	0,157	0,549	0,556	4,49	67,7	3,54
60	0,0199	983,2	0,658	4,180	0,160	0,47	0,478	5,11	66,2	2,98
70	0,0312	977,8	0,668	4,187	0,163	0,405	0,415	5,70	64,4	2,55
80	0,0473	971,8	0,675	4,195	0,166	0,355	0,365	6,32	62,6	2,21
90	0,07	965,3	0,679	4,205	0,167	0,314	0,326	6,95	60,7	1,95

Продовження додатку 2.

t, °C	$\rho$ , МН/м <sup>2</sup>	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/м·°C	c, кДж/кг·°C	$\alpha \cdot 10^6$ , м <sup>3</sup> /с	$\mu \cdot 10^3$ , Па·с	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$\beta \cdot 10^4$ , 1/°C	$\sigma \cdot 10^3$ , Н/м	Pr
100	0,101	958,4	0,682	4,22	0,169	0,282	0,295	7,52	58,8	1,75
120	0,199	943,0	0,686	4,254	0,171	0,238	0,252	8,64	54,9	1,47
140	0,361	926,1	0,684	4,306	0,172	0,201	0,217	9,72	50,7	1,26
160	0,617	907,4	0,682	4,35	0,172	0,173	0,191	10,7	46,6	1,1
180	1,0	886,9	0,673	4,42	0,172	0,153	0,172	11,9	42,3	1,0
200	1,56	863,0	0,661	4,51	0,170	0,136	0,158	13,3	37,6	0,93
220	2,31	840,3	0,645	4,61	0,166	0,125	0,148	14,8	33,2	0,89
240	3,34	813,6	0,626	4,76	0,163	0,115	0,141	16,8	28,5	0,87
260	4,68	784,0	0,605	4,95	0,156	0,106	0,135	19,7	23,7	0,87
280	6,42	750,7	0,574	5,24	0,146	0,098	0,131	23,7	19,1	0,9
300	8,57	712,5	0,539	5,75	0,132	0,091	0,128	29,2	14,4	0,97
320	11,27	667,1	0,505	6,59	0,115	0,085	0,128	38,2	9,81	1,11
340	14,6	610,1	0,456	8,19	0,0916	0,077	0,127	53,4	5,66	1,39
360	18,65	528,0	0,395	13,95	0,0536	0,067	0,126	109,0	2,02	2,35
370	21,0	450,5	0,338	40,4	0,0186	0,057	0,126	264,0	0,47	6,79

Додаток 3. - Теплофізичні коефіцієнти сухого повітря при  $p = 100 \text{ кН/м}^2$ .

t, °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$C_p$ , кДж/кг·°C	$\lambda \cdot 10^2$ , Вт/м·°C	$\alpha \cdot 10^6$ , м <sup>3</sup> /с	$\mu \cdot 10^6$ , Па·с	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	Pr
-50	1,584	1,013	2,04	12,7	14,6	9,23	0,728
-40	1,515	1,013	2,12	13,8	15,2	10,04	0,728
-30	1,453	1,013	2,2	14,9	15,7	10,80	0,723
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	16,2	11,59	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	17,4	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,1	17,7	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,6	21,6	18,2	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,7	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,75	24,4	19,1	16,96	0,699

50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,6	17,95	0,698
60	1,06	1,005	2,9	27,2	20,1	18,97	0,696
80	1,00	1,009	3,05	30,3	21,1	21,09	0,692
100	0,946	1,009	3,22	33,6	21,9	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,33	36,8	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,6	23,7	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,64	44,0	24,5	30,09	0,682
180	0,779	1,021	3,78	47,6	25,3	32,49	0,681
200	0,746	1,025	3,96	51,5	26,0	34,85	0,680
250	0,674	1,038	4,25	60,6	27,3	40,61	0,677
300	0,615	1,046	4,6	71,5	29,7	48,33	0,674
400	0,524	1,067	5,2	93,2	33,1	63,09	0,678
500	0,456	1,089	3,74	115,2	36,1	79,38	0,687
600	0,404	1,112	6,22	138,2	39,1	96,89	0,699
700	0,362	1,131	6,71	163,5	41,8	115,4	0,706
800	0,329	1,152	7,17	188,5	44,3	134,8	0,713
1000	0,277	1,182	8,06	246,0	49,0	177,1	0,719

Додаток 4. - Середні ізобарні мольні теплоємності деяких газів кДж/(кмоль·К).

t, °C	Повітря	Кисень O <sub>2</sub>	Азот N <sub>2</sub>	Водень H <sub>2</sub>	Водяна пара H <sub>2</sub> O	Оксид вуглецю CO	Вуглекислий газ CO <sub>2</sub>
0	29,073	29,274	29,115	28,617	33,499	29,123	35,860
100	29,153	29,538	29,144	29,935	33,741	29,178	38,112
200	29,299	29,931	29,228	29,073	34,188	29,303	40,059
300	29,531	30,400	29,383	29,123	34,575	29,517	41,755
400	29,789	30,878	29,601	29,186	35,090	29,789	43,250
500	30,095	31,334	29,864	29,249	35,630	30,099	44,573
600	30,405	31,761	30,149	29,316	36,195	30,426	45,758
700	30,723	32,150	30,451	29,408	36,789	30,752	46,813
800	31,028	32,502	30,748	29,517	37,392	31,070	47,763
900	31,321	32,825	31,037	29,647	38,008	31,376	48,617
1000	31,598	33,118	31,313	29,789	38,619	31,665	49,392
1200	32,109	33,633	31,828	30,107	39,825	32,192	50,740
1400	32,565	34,076	32,293	30,467	40,976	32,653	51,858
1600	32,967	34,474	32,699	30,832	42,056	33,051	52,800
1800	33,319	34,834	33,055	31,192	43,070	33,402	53,604
2000	33,641	35,169	33,373	31,548	43,995	33,708	54,290
2200	33,296	35,483	33,658	31,891	44,853	33,980	54,881
2400	34,185	35,785	33,909	32,222	45,645	34,223	55,391

Додаток 5 - Мольні теплоємності газів

Гази	$\mu C_v$	$\mu C_p$
Одноатомні	12,5	20,8
Двоатомні	20,8	29,1
Три- і багатоатомні	29,1	37,4

Додаток 6 - Середня ізобарна мольна теплоємність ідеальних газів  $\mu C_p \cdot 10^{-3}$  Дж/кмоль $\cdot$ °C за спектрографічними даними).

Температура $t, ^\circ\text{C}$	Гази					
	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Повітря	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
0	28,62	29,12	29,27	29,07	35,86	33,50
100	28,93	29,14	29,54	29,15	38,11	33,74
200	29,07	29,23	29,93	29,30	40,06	34,12
300	29,12	29,38	30,40	29,52	41,76	34,58
400	29,19	29,60	30,88	29,79	43,25	35,09
500	29,25	29,86	31,33	30,10	44,57	35,63
600	29,32	30,15	31,76	30,41	45,75	36,20
700	29,41	30,45	32,15	30,72	46,81	36,79
800	29,52	30,75	32,50	31,03	47,76	37,39
900	29,65	31,04	32,83	31,32	48,62	38,01
1000	29,79	31,31	33,12	31,60	49,40	38,62
1100	29,94	31,58	33,39	31,86	50,10	39,23
1200	30,11	31,83	33,63	32,11	50,74	39,83
1300	30,29	32,07	33,86	32,34	51,32	40,41
1400	30,47	32,29	34,08	32,57	51,86	40,98
1500	30,65	32,50	34,28	32,77	52,35	41,53

Додаток 7. – Молекулярна вага та густина деяких газів при нормальних технічних умовах.

Газ	Хімічне позначення	Молекулярна вага	Густина $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
Водень	H <sub>2</sub>	2	0,0898
Метан	CH <sub>4</sub>	16	0,717
Аміак	NH <sub>3</sub>	17	0,771
Азот	N <sub>2</sub>	28	1,251
Повітря	-	28,96	1,293
Кисень	O <sub>2</sub>	32	1,429
Вуглекислота	CO <sub>2</sub>	44	1,977

Додаток 8. – Значення констант  $s$  і  $n$  при вільній конвекції для горизонтальної труби в залежності від режиму руху.

№	Режим руху	$Gr \cdot Pr$	$s$	$n$
1.	Плівковий	$<10^{-5}$	0,4	0
2.	Перехідний	$10^{-5} - 5 \cdot 10^2$	1,18	0,125
3.	Ламінарний	$5 \cdot 10^2 - 10^9$	0,54	0,25
4.	Турбулентний	$10^9 - 10^{12}$	0,13	0,33





